

(19)日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平10-241429

(43)公開日 平成10年(1998)9月11日

(51)Int.Cl.^a
F 21 V 8/00
// H 01 S 3/17

識別記号

F I
F 21 V 8/00
H 01 S 3/17

B

審査請求 未請求 請求項の数31 FD (全 14 頁)

(21)出願番号 特願平9-361629

(22)出願日 平成9年(1997)12月11日

(31)優先権主張番号 08/764577

(32)優先日 1996年12月13日

(33)優先権主張国 米国(US)

(71)出願人 591163122

ザ ポード オブ ト拉斯ティーズ オブ
ザ リーランド スタンフォード ジュ
ニア ユニバーシティ

アメリカ合衆国、カリフォルニア州
94305、スタンフォード (番地なし)

(72)発明者 ジェファーソン エル. ワグナー

アメリカ合衆国、22901、バージニア州
シャロッツビル グレードレーン 341

(74)代理人 弁理士 児玉 喜博

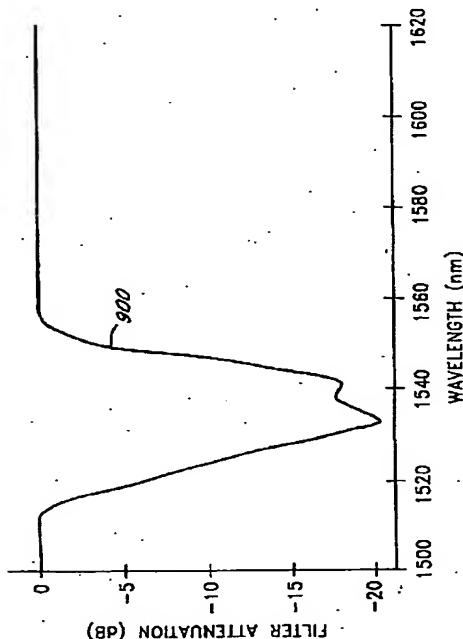
最終頁に続く

(54)【発明の名称】スペクトル・フィルタリングを組み込んだ安定したファイバASE光源

(57)【要約】

【課題】 本発明の態様の一つは希土類元素でドープした、光を伝搬するファイバを含む安定した増幅自然発光(ASE)光源の提供。

【解決手段】 希土類元素でドープされた光学的伝搬ファイバと、光エネルギーを前記ファイバに注入して、スペクトル形状および平均波長を有している光信号の前記ファイバからの放出を誘起するポンプ光源と、前記光信号のスペクトル形状を変更して、前記光信号の前記平均波長を動作パラメータに関して安定させる、前記ファイバに沿った位置に配置されているスペクトル・フィルタとを備えている安定した増幅自然発光(ASE)光源。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 希土類元素でドープされた光学的伝搬ファイバと、光エネルギーを前記ファイバに注入して、スペクトル形状および平均波長を有している光信号の前記ファイバからの放出を誘起するポンプ光源と、前記光信号のスペクトル形状を変更して、前記光信号の前記平均波長を動作パラメータに関して安定させる、前記ファイバに沿った位置に配置されているスペクトル・フィルタとを備えている増幅自然発光(ASE)光源。

【請求項2】 前記動作パラメータが、ポンプ波長である請求項1に記載の安定したASE光源。

【請求項3】 前記動作パラメータが、ポンプ電力である請求項1に記載の安定したASE光源。

【請求項4】 前記動作パラメータが、フィードバックである請求項1に記載の安定したASE光源。

【請求項5】 前記動作パラメータが、温度である請求項1に記載の安定したASE光源。

【請求項6】 前記動作パラメータが、ポンプ波長とポンプ電力を含んでいる請求項1に記載の安定したASE光源。

【請求項7】 前記動作パラメータが、ポンプ波長とフィードバックとを含んでいる請求項1に記載の安定したASE光源。

【請求項8】 前記動作パラメータが、ポンプ電力とフィードバックとを含んでる請求項1に記載の安定したASE光源。

【請求項9】 前記動作パラメータが、ポンプ波長と、ポンプ電力と、フィードバックとを含んでる請求項1に記載の安定したASE光源。

【請求項10】 前記動作パラメータが、ポンプ波長と、ポンプ電力と、フィードバックと、温度とを含んでる請求項1に記載の安定したASE光源。

【請求項11】 ポンプ光源からのポンプ光を希土類元素でドープされた光ファイバに注入し、前記ポンプ光が前記ファイバ内を伝播し、スペクトル形状および平均波長を有している光信号の前記ファイバからの放出を誘起するステップと、前記ファイバに沿った位置に配置されたスペクトル・フィルタを使用して前記光信号の前記スペクトル形状を変更し、これによって前記ファイバからの前記光信号の前記平均波長を動作パラメータに関して安定させるステップとを備えている増幅自然発光を発生する方法。

【請求項12】 前記動作パラメータが、ポンプ波長である請求項11に記載の方法。

【請求項13】 前記動作パラメータが、ポンプ電力である請求項11に記載の方法。

【請求項14】 前記動作パラメータが、フィードバッ

クである請求項11に記載の方法。

【請求項15】 前記動作パラメータが、温度である請求項11に記載の方法。

【請求項16】 前記動作パラメータが、ポンプ波長とポンプ電力を含んでる請求項11に記載の方法。

【請求項17】 前記動作パラメータが、ポンプ波長とフィードバックとを含んでる請求項11に記載の方法。

【請求項18】 前記動作パラメータが、ポンプ電力とフィードバックとを含んでる請求項11に記載の方法。

【請求項19】 前記動作パラメータが、ポンプ波長と、ポンプ電力と、フィードバックとを含んでる請求項11に記載の方法。

【請求項20】 前記動作パラメータが、ポンプ波長と、ポンプ電力と、フィードバックと、温度とを含んでる請求項11に記載の方法。

【請求項21】 前記ファイバに沿った前記位置が、前記動作パラメータに関して前記平均波長に最適な安定性を与えるように選択される請求項11に記載の方法。

【請求項22】 ポンプ光源からのポンプ光を希土類元素でドープされた光ファイバに注入し、前記ポンプ光が前記ファイバ内を伝播し、スペクトル形状および平均波長を有している光信号の前記ファイバからの放出を誘起するステップと、

スペクトル・フィルタに対して減衰特性を選択するステップと、

前記スペクトル・フィルタを選択された位置で前記光ファイバに配置して、選択したパラメータに関して前記ファイバからの前記光信号の前記平均波長に安定した動作点を与えるステップとを備えているファイバ増幅自然発光光源に安定した動作点を与える方法。

【請求項23】 前記選択したパラメータが、ポンプ波長である請求項22に記載の方法。

【請求項24】 前記選択したパラメータが、ポンプ電力である請求項22に記載の方法。

【請求項25】 前記選択したパラメータが、フィードバックである請求項22に記載の方法。

【請求項26】 前記選択したパラメータが、温度である請求項22に記載の方法。

【請求項27】 前記選択したパラメータが、ポンプ波長とポンプ電力を含んでる請求項22に記載の方法。

【請求項28】 前記選択したパラメータが、ポンプ波長とフィードバックとを含んでる請求項22に記載の方法。

【請求項29】 前記選択したパラメータが、ポンプ電力とフィードバックとを含んでる請求項22に記載の方法。

【請求項30】 前記選択したパラメータが、ポンプ波

長と、ポンプ電力と、フィードバックとを含んでいる請求項22に記載の方法。

【請求項31】前記選択したパラメータが、ポンプ波長と、ポンプ電力と、フィードバックと、温度とを含んでいる請求項22に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明はファイバ增幅自然発光(ASE)光源に関する。

【0002】

【従来の技術】ファイバASE光源は当分野で周知である。ASE光源は、複数のアプリケーションに対して広帯域(たとえば、10ないし30ナノメートル程度の)で単一空間モードの光束を与えるために使用すると有利なものである。たとえば、ASE光源はファイバオプティック・ジャイロスコープへの入力としてレーザ光を与えるために使用されている。例示的な超蛍光ファイバ光源の説明については、Emmanuel DesurvireおよびJ. R. Simpsonの「Amplification of Spontaneous Emission in Erbium-Doped Single-Mode Fibers」、IEEE、「Journal of Lightwave Technology」、Vol. 7、No. 5、1989年5月を参照されたい。

【0003】ASE光源は、通常、イオン三価希土類元素でドープされたコアを有するある長さの単一モード・ファイバからなっている。たとえば、ネオジム(Nd^{3+})およびエルビウム(Er^{3+})はコアがレーザ媒体として作用するように単一モード・ファイバのコアをドープするのに使用できる希土類元素である。

【0004】ファイバは、一端でポンプ入力信号を受ける。ポンプ信号は、通常、特定の波長入_λを有するレーザ信号である。ファイバ・コア内のイオンは波長入_λの入力レーザ放射線を吸収するため、これらのイオンの外殻内の電子がイオンの高いエネルギー状態へ励起される。十分なポンプ電力がファイバの端部へ入力された場合、反転分布が発生し(すなわち、励起状態の電子の方が基底状態の電子よりもイオン内で多くなる)、多量の蛍光がファイバの長さに沿って生じる。周知の通り、蛍光(すなわち、異なる波長入_λでの光子の放出)は、励起状態から基底状態への電子の自然復帰によるものであるから、励起状態から基底状態への遷移中に波長入_λの光子が放出される。ファイバから波長入_λで放出される光は、従来のレーザ光と同様、指向性の強い光である。しかしながら、この放出を従来のレーザ(すなわち、光共振器が組み込まれたもの)と異なるものとしているこの放出の主な特性の1つは、超蛍光ファイバ光源から放出されるスペクトル内容が一般にきわめて広い(10ナノメートルと30ナノメートルの間)ことである。それ故、ファイバが出力する光信号は通常、波長入_λ±15ナノメートルである。この原理はレーザ物理学で周知のものであり、ネオジム・ドープおよびエルビウム・ドー

プのファイバにおいて、また他の希土類でドープされたファイバにおいて、数年間にわたり実験的および理論的に研究されてきた。ASE光源から放出される光には多くの用途がある。たとえば、ある用途において、ASE光源の出力はファイバオプティック・ジャイロスコープに給送される。当分野の技術者がよく理解している理由から、ファイバオプティック・ジャイロスコープはきわめて安定している広帯域光源で動作する必要がある。存在していることが知られている数種類の広帯域光源のうち、特にエルビウム・ドープ・ファイバ製の超蛍光ファイバ光源は、これまで慣性航法グレードのファイバオプティック・ジャイロスコープに対する厳しい要件を満たす唯一の光学源であった。エルビウム・ドープ・ファイバが発生する広帯域の光は、エルビウム・ドープ・ファイバ光源のポンプ電力要件が低く、波長安定性が優れていることと相まって、このような光源をファイバオプティック・ジャイロスコープに使用する主な理由となっている。

【0005】エルビウム・ドープ・ファイバにおいて、超蛍光ファイバ光源の放出は双方向性である。すなわち、電子がエルビウム・イオンの基底状態へ戻ることによって放出される光は、通常、ファイバの両端から放出される。Kalmann他の米国特許第5185749号に記載されているように、十分な長さのエルビウム・ファイバの場合、逆方向(すなわち、ポンプ信号が伝搬する方向と逆の方向)に伝搬する光はきわめて高い量子効率を有している。それ故、ASEエルビウム・ドープ光源から放出される光がファイバのポンプ入力端部から(すなわち、逆伝搬方向へ)放出されるようにエルビウム光源を実施するのが有利である。

【0006】ASE光源は、一般に、2つの構成の一方で実施される。シングルパスASE光源と呼ばれる第1の構成においては、超蛍光光源出力電力は2つの方向へ放出され、その方向の一方は使用されない。ダブルパスASE光源と呼ばれる第2の構成においては、反射器がファイバの一方端に配置されて、超蛍光信号がファイバへもう一度送られるように超蛍光光源信号を反射する。ファイバが信号波長においてゲインを示すため、信号は増幅される。ダブルパス構成の利点の1つはこれが強い信号を発生することである。ダブルパスASE光源構成も一方のポートにおいてだけ(すなわち、1方向に)出力を発生する。このような構成の欠点はレーザ作用を防止するために(たとえば、光遮断器の使用に伴って)フィードバックをきわめて低くしておかなければならぬことである。

【0007】

【発明が解決しようとする課題】ファイバオプティック・ジャイロスコープに適用する場合、光源の性能に関する重要な尺度の一つは、光源平均波長の安定性である(たとえば、Kilmの米国特許第5355216号参

照)。当分野において周知のように、光源平均波長の安定性は、センサの目盛係数誤差の安定性に直接影響する。目盛係数誤差は、ジャイロスコープの回転の精確な測定値を精密な値まで決定するのに重要である。ポンプ波長、ポンプ電力、温度、フィードバックなどのシステム・パラメータの安定度が妥当なものであると想定して、数ppmの平均波長安定性を有している光源が存在している。しかしながら、平均波長が1ppm未満の安定性がいくつかの用途では望ましい。

【0008】

【課題を解決するための手段】本発明の態様の一つは、希土類元素でドープした光を伝搬するファイバを含む安定した增幅自然発光(ASE)光源である。ポンプ光源が光エネルギーをファイバに注入して、ファイバからの光信号の放出を誘発する。光信号はスペクトル形状と平均波長を有している。スペクトル・フィルタをファイバに沿った箇所に配置して、光信号のスペクトル形状を変更し、光信号の平均波長を動作パラメータに関して安定させる。実施の形態の1つにおいて、動作パラメータはポンプ波長である。他の態様において、動作パラメータはポンプ電力である。さらに他の態様においては、動作パラメータはフィードバックである。さらにまた他の態様においては、動作パラメータは温度である。

【0009】本発明の他の態様は、安定した增幅自然発光を発生させる方法である。この方法は、ポンプ光源からポンプ光を希土類元素でドープされた光ファイバに注入するステップを備えている。ポンプ光はファイバ中を伝搬し、ファイバから光信号を誘発する。光信号はスペクトル形状と平均波長を有している。この方法は、さらにファイバに沿った箇所に配置し、これによって光ファイバの卑近波長を動作パラメータに関して安定させるスペクトル・フィルタを使用して、光信号のスペクトル形状を変更するステップを備えている。実施の形態の1つにおいて、動作パラメータはポンプ波長である。他の態様において、動作パラメータはポンプ電力である。さらに他の態様においては、動作パラメータはフィードバックである。さらにまた他の態様においては、動作パラメータは温度である。

【0010】

【発明の実施の形態】本発明の好ましい実施の形態によれば、重要なシステム・パラメータに対して平均波長で1ppm未満の安定性を達成するASE光源が提供される。ppm単位での安定性の尺度を達成するために、平均波長に対して動作パラメータを関連づける曲線の傾きが正規化され(すなわち、安定性を測定するパラメータ動作点を測定する量によって除算される。)、100万が乗算される。この新しい光源は、ASE光源を安定化するように作用する全ファイバ・スペクトル・フィルタを補間する。好ましい実施の形態の1つにおいて、スペクトル・フィルタはファイバの長周期格子である。長周

期格子は主伝達モードのファイバからの光を、クラッディング・モードのファイバに選択的に結合する。これらの格子は波長依存度が高く、それ故、スペクトル・フィルタとして使用することができる。

【0011】フィルタの特性、ならびにASEファイバの長さとファイバに沿ったフィルタの位置を調節することによって、ポンプ電力およびフィードバック(たとえば、ファイバ・ジャイロからの)に関して、安定した平均波長の動作点が見つけだされる。平均波長安定性の向上は、ポンプ波長に対しても達成される。本発明の好ましい実施の形態によれば、これらの安定点を妥当な動作点(たとえば、妥当なポンプ電力、妥当なポンプ波長、妥当なフィードバック・レベルなど)に対応させて設定することができる。

【0012】図1および図3は、フィルタ特性を調節することによって、出力信号の平均波長を安定させるために使用される好ましい実施の形態の方法を示し、図2Aないし図2Cはフィルタの位置をASEファイバの長さに沿って調節した結果を示す。

【0013】図1は、典型的なASEエルビウム・ドープ・ファイバ光源に対する、出力スペクトル密度と波長のグラフである。図1のグラフからわかるように、この光源から放出される光の出力スペクトル密度は、2つの顕著なピークを有している。第1のピーク100は、約1560ナノメートルのところで生じており、第2のピーク110は、約1535ナノメートルのところに生じている。図1に示したような出力信号特性を有するASEエルビウムドープ・ファイバ光源が平均波長の数ppmの範囲(たとえば、 $\lambda_s \pm \lambda_s \cdot 3 \cdot 10^{-6}$)内できわめて安定であることが判明した。しかしながら、数ppm未満での平均波長の安定性は、これらのスペクトル特性を備えた光源によってはこれまで得ることができなかつた。

【0014】本発明者らは、エルビウムドープASE出力信号におけるピークの一方(すなわち、1535ナノメートルにあるピーク、または1560ナノメートルにあるピークのいずれか)をエンファシスすることによって、出力信号に対する平均波長の安定性を大幅に(たとえば、これまでの光源の安定性の10倍程度)改善できることを認識した。この安定性の増加について考えられる理由の1つはピークの一方(好ましくは、1535ナノメートルにあるピーク)をデエンファシスすることによって、ピーク100、110が互いに「競合」しなくなることである。すなわち、ASE内で発生し、これによって增幅された光子は2つのピーク100、110の近傍で放出される傾向がある。重要な動作パラメータの変動により、光子が一方のピークよりも他方に近いところで放出されるようにバイアスされ、一方のピークから他方のピークへの出力スペクトル密度のシフトが観察される。このシフトは出力信号の平均波長の安定度を低下

させる。それ故、ピーク100、110の一方をデエンファシスすることによって、单一のピークのみが残ることになる。单一ピークのスペクトル分布においては、一方のピークから他方のピークへの、出力スペクトル密度の大幅なシフトは生じない。それ故、ピーク100、110の一方がデエンファシスされると、光子の大多数が残っている单一のピークの周囲で安定状態を保つ。

【0015】図3は、ノッチ・フィルタを使用して1535ナノメートルのところにあるピークをデエンファシスして、より安定したASE光源出力に到達する方法を示す。第1の曲線300は、フィルタリング前のASE光源の出力を示す。曲線300は、図1に示す曲線とほぼ同じものである。曲線310は、ファイバASE光源の長さに沿ったある点に設けられたノッチフィルタのスペクトル特性を表す。Y軸がマイナス・デシベルで減衰を表していることに留意されたい。すなわち、大きい減衰はY軸に沿った小さい変位で表されている(図9参照)。曲線310の正確なスペクトル形状はアプリケーションごとに異なるが、例示的なスペクトル形状を厳密に定義し、図9を参照して説明する。ASEファイバ光源で得られるスペクトル出力(ノッチ・フィルタによって変更された)は、図3の曲線320によって表されている。図3から、曲線320が1560ナノメートルのところに1つの主なピークを有しており、1535ナノメートルのところのピークがノッチ・フィルタ310によって大幅に減衰されていることに留意すべきである。

【0016】図2Aないし図2Cは、スペクトル・フィルタがASEファイバ光源の長さに沿ったさまざまな箇所に配置されている場合に、ASEファイバ光源のスペクトル出力で達成される結果を示す。図2Aに示す第1の場合において、端部210、215を有するファイバ205を備えているASE光源200は、ファイバ205の端部215の近傍にスペクトル・フィルタ220を含んでいる。ポンプ光は、ポンプ光源225からスペクトル・フィルタ220の位置と反対側のファイバの端部210に入力される。ASEファイバ光源200が逆方向伝搬信号の量子効率を利用するのに十分な長さのエルビウムドープ・ファイバを備えているのであるから、ASEファイバ光源200が出力する信号の大多数がファイバ205のポンプ入力端部210から与えられる。

【0017】ASE光源200からの出力の波長に対してプロットされたスペクトル密度が、図2Aの曲線228によって表されている。曲線228の特性からわかるように、ASEファイバ光源200から出力される信号は、小さい電力損失ならびに小さいスペクトル変化を示す。すなわち、曲線228は、図1の曲線および図3の曲線300とほぼ同じスペクトル特性を有しており、1535ナノメートルおよび1560ナノメートル両方の波長において顕著なピークが見られる。それ故、図2から、ファイバ205の端部215に向かってスペクトル

・フィルタ220を配置することによって、ASE光源200からの出力信号の安定性に実質的な改善がもたらされないことがわかる。

【0018】図2Cは、端部270、275を有するファイバ265を備えており、かつファイバ265の端部270の近傍にスペクトル・フィルタ280を含んでいるASE光源260を示す。ポンプ光がポンプ光源285から、スペクトル・フィルタ280の位置の近くにあるファイバの端部270へ入力される。ASEファイバ光源260が逆方向伝搬信号の高い量子効率を利用するのに十分な長さのエルビウムドープ・ファイバを備えているため、ASEファイバ光源260が出力する信号の大部分が、ファイバ265のポンプ入力端部270から与えられる。

【0019】図2Cの曲線288は、ASEファイバ光源260からの出力信号の波長に対してプロットされた出力スペクトル密度を示す。曲線288の特性からわかるように、ASE光源260のスペクトル出力が大幅に変化して、1535ナノメートルの波長におけるピークをデエンファシスするが、出力信号における全体的な電力も、ファイバ265のポンプ入力端部270の近傍にスペクトル・フィルタ280を配置することによって大幅に低下する。それ故、大幅なスペクトル変化に関連する安定性の利点が出力信号の電力の大幅な低下によってオフセットされる。

【0020】図2Bは、端部240、245を有するファイバ235を備えており、ファイバ235の中間部の近くにスペクトル・フィルタ250を含んでいるASE光源230を示す。ポンプ光がポンプ光源255から、ファイバ235の端部240へ入力される。ASEファイバ光源230が逆方向伝搬信号の高い量子効率を利用するのに十分な長さのエルビウムドープ・ファイバを備えているため、ASEファイバ光源230が出力する信号の大部分が、ファイバ235のポンプ入力端部240から与えられる。

【0021】曲線258は、波長に対してプロットされたASE光源230から出力された信号の出力スペクトル密度を表す。図2の曲線258からわかるように、ファイバ235の中心に向かって配置されたスペクトル・フィルタ250を有するASE光源230の出力は、出力信号に大幅な電力損失を引き起こすことなく大幅なスペクトル変化を示す。それ故、1535ナノメートルのところにあるピークは大幅に減衰され、出力信号の全電力はほぼ同じままである。また、それ故、ファイバ235の中心に向かって配置されたスペクトル・フィルタ250を有しているASEファイバ光源230は、ASEファイバ光源230からの出力の平均は長を安定させる目的にはきわめて有利である。

【0022】スペクトル・フィルタ250がファイバ235の中心に向かって配置されているこの実施の形態に

において電力損失が少ない理由は、1535ナノメートルの波長に近い光が減衰し、それ故、フィルタ250の後のフィルタ235におけるゲインを飽和させることができなく、1560ナノメートルの波長に近い光が大きいゲインを受けることを可能とする。すなわち、イオンのうちわずかなものが誘発されて、1535ナノメートルのピークに近い光を放出し、また、多くのイオンが誘発されて、ファイバ235内のフィルタ250の後ろで1560ナノメートルに近い光を放出する。すなわち、1535ナノメートルの波長ピークの光がフィルタされず、減衰しない場合ほど、1535ナノメートルのピークに近い減衰された光によって反転分布が大幅に少なくなることがなく、したがって1560ナノメートルの波長ピークに近い光子を発生するのに、より多くのイオンが利用できる。それ故、本発明の好ましい実施の形態によれば、ASEファイバ光源230の端部240に与えられる出力信号は、1560ナノメートルの波長の近くでより強く増幅され、また1535ナノメートルの波長の近くで減衰される。同様な挙動が順方向伝搬信号（好ましい実施の形態を説明するにあたり、単純化のために図示されていない）に適用されることに留意すべきである。これは好ましい実施の形態の主要な概念を説明するものである。すなわち、スペクトル・フィルタによって波長ピークの一方を減衰することは、その波長ピークの近くの出力を下げるが、他の波長ピークで得られるゲイン（それゆえ、出力）を増やすものである。

【0023】スペクトル・フィルタ250の最適な位置がいくつかのパラメータの関数であることが理解されよう。たとえば、フィードバック・レベルに対する平均波長の安定性は、フィルタの位置にきわめて敏感である。フィルタ250をファイバ235のポンプ端部240へ向かって移動させた場合、安定した動作点を示すフィードバック・レベルが上がる。フィルタがファイバ端部240に近すぎる場合には、フィードバック・レベルに対する安定した動作点は存在しない。これはフィルタの適切な位置を選ぶ方法の1つである。同時に、ファイバ235のポンプ端部240へ向かってフィルタ250を移動させると、低ポンプ電力におけるポンプ電力の変動（240dBというファイバ全体の小さい減衰に対して10ないし20mW）のため、平均波長の安定性が低下する。実際問題として、フィルタ250の位置はファイバ235の小信号減衰点30dBと120dBの間でなければならないが、ある種の用途ではフィルタ250をファイバ235の小信号減衰点0dBと200dBの間にフィルタを置くことが必要である。

【0024】ファイバ235のいわゆる小信号減衰特性を決定するために、いくつかの技法を使用することができる。技法の1つは低電力の光信号をファイバの端部へ送ることである。これはこのテスト信号の波長がポンプの吸収、すなわち信号吸収帯域に近い場合（本明細書で

検討する結果はエルビウムに対する放出波長1.53マイクロメートルにおけるテスト信号に基づいたものである）に有利である。このテスト・フェーズ中、低電力テスト信号がファイバを通って伝搬する唯一の信号となる（すなわち、ポンプ信号はファイバへ導入されない）。さらに、信号の電力は信号が非飽和となるのに十分な低さのものでなければならない（すなわち、反転分布が実質的に生じない）。

【0025】エルビウムドープ・ファイバの場合、小信号に対する減衰がファイバの長さに正比例していく、1メートルのところの減衰を測定するだけでよいことが判明した。たとえば、テスト信号波長における減衰が3dB/mである場合には、100mのファイバは300dBの長さのファイバを画定することになる。

【0026】ここで、信号は選択した長さのファイバに沿って大幅に減衰するものであるが、実際問題では、正規の動作電力（約20mW）におけるポンプ信号が通常は、同じ長さのファイバに沿ったテスト信号と同じ程度に減衰しないことに留意すべきである。これはポンプ信号がより多くの電力を搬送し、ポンプ入力に向かった領域においてファイバを飽和させる可能性があるため、ファイバの端部におけるポンプ信号の実際の減衰が25ないし30dBにしかならないためである。この減衰時のポンプ信号は入_sにおける放出信号光に関する限り、依然顕著であるが、これはファイバが通常ファイバの遠隔端部で放出された光子に対して20-40dBのゲインを示すからである。それ故、ファイバが、たとえばテスト信号に対して300dBの減衰を生じるのに十分な長さであったとしても、テスト信号電力よりもはるかに高いポンプ電力に関連付けられた効果により、この長さよりも大幅に短い長さがフィルタ250の配置に影響を及ぼすこととなる。

【0027】フィルタ250の最適な位置を探し出すこの方法によれば、一定の小信号減衰点（すなわち、低電力のテスト信号を使用して測定した点）が、十分な長さ以上のすべてのファイバに対する最適点として指定される。

【0028】好ましい実施の形態において、小信号減衰が3dB/m（1530nmにおいて）を有する77メートルのシングルモード・ファイバは、36.75dBの点（すなわち、出力から12.25メートル）に配置されたフィルタを含んでいる。フィルタのスペクトル特性は図9に示したものと対応している。このファイバの場合、最適なポンプ電力に対するモデル化動作点は約15mWであり、最適なフィードバックに対するモデル化動作点は約-20dBであり、最適なポンプ波長に対するモデル化動作点は約1470ナノメートルである。これらの動作点の各々は、ほとんどのASE高原の用途に妥当な動作点である。モデル化されたファイバのコア直径は3-4ミクロンであった。実験の結果において、こ

のようなファイバをASE光源として用いた場合、このような高原の安定性は従来の光源よりも大幅に高められた。

【0029】図4Aおよび図4Bは、ポンプ電力に対して平均は超安定性を高めたことにより、本発明の好ましい実施の形態によって得ることのできる利点である。図4Aに示すように、曲線400はポンプ電力（ミリワット単位で測定した）に対する平均波長（ナノメートルで測定した）の変動を表す。曲線400は、フィルタをASEファイバ光源内に配置しない（したがって、最適スペクトルが図1に示すようにフィルタされていない）場合の平均波長の変動を表す。図4Aの曲線400からわかるように、ポンプ電力における5ミリワットの変動は、未フィルタのASE光源の安定した動作点の近くであっても、ほぼ0.1ナノメートルという平均波長の変動をもたらすことになる。さらに、15ミリワットの動作点におけるポンプ電力の曲線400に対する接線の傾きは、13ppm/mWという安定度に対応している。

【0030】しかしながら、本発明の好ましい実施の形態によれば、ファイバ235に沿った適切な位置において適切な特性を有しているスペクトル・フィルタを間挿することにより、ポンプ電力に対する平均波長の安定性を大幅に向上させることができる。たとえば、図4Bに示す曲線450は、スペクトル・フィルタ250がファイバ235の長さに沿って適切に配置されている（たとえば、36.75dBの点に）ファイバ光源230におけるポンプ電力に対する平均波長の変動を表す。図4Bからわかるように、曲線450の安定点を中心とした約5ミリワットというポンプ電力の変動は、0.1ナノメートルよりも大幅に少ない平均波長の変動をもたらす。それ故、スペクトル・フィルタ250を光源230に間挿することにより、ポンプ電力における同等な変動が平均波長の変動を大幅に少なくする。

【0031】本発明によって得られる安定性の増加に加えて、安定した平均波長点が生じる動作点をいくつかのシステム設計パラメータを変更することによって変更できることを理解されたい。これは妥当な動作点に生じることもあれば、生じないこともある単一の安定動作点が存在している従来の未フィルタの光源と対照的なものである。たとえば、安定動作点が100mWというポンプ電力で生じる場合、このポンプ電力がきわめて高いため、この安定点はほとんどの用途で利用できない。ポンプ電力に対する平均波長の安定点を決定する場合、ファイバ235の全長を変更すると、安定動作点が調節されるため、ファイバの長さを調節することにより希望する安定点を設定することができる。たとえば、本明細書に記載した実施の形態の場合、ファイバの長さを伸ばすと安定動作点が生じる出力レベルが上がる。

【0032】同様な態様で、フィルタ・スペクトルの形状を変更することによって、ポンプ波長に対する平均波

長の安定点を調節することができ、フィードバック・レベルに対する平均波長の安定点を、ファイバ235の長さに沿ってフィルタの位置を変更することによって調節することができる。温度安定性もフィルタ・スペクトルの形状を変更することによって調節することができる。たとえば、実施の形態の1つにおいて、フィルタ特性を調節して、ノッチのもっとも深い部分が1535ナノメートルよりも若干長い波長にする。それ故、フィルタ250が広がると（これによってより長い波長をフィルタするようにノッチを移動する）、ノッチのついたピーク（1535ナノメートルのところの）が大きくなる。これはエルビウムが高い温度で膨張したときに長い波長へシフトする傾向もあるエンファシスされたピークを釣り合わせるように作用する。

【0033】図5Aおよび図5Bは、スペクトル・フィルタ250をASE光源230へ導入することによって達成されるポンプ波長に対する平均波長安定性の増加を示すグラフである。図5Aに示した第1の曲線500は、スペクトル・フィルタ250が存在しない場合のポンプ波長に対する平均出力信号波長の変動を表す。1470ナノメートルという動作ポンプ波長において、（1ナノメートルのポンプ波長の変動（すなわち、1469ナノメートルから1471ナノメートルへの）は約0.07ナノメートルという平均波長の変動をもたらす（約23ppm/nmに対応）。図5Bに示した曲線550は、スペクトル・フィルタ250が存在している場合のポンプ波長に対する平均波長の変動を表す。図5Bに示すように、1469ナノメートルから1471ナノメートルへのポンプ波長の変動は、平均波長の正味の変化をもたらさない。これは1470ナノメートルというポンプ波長が設定されていて（すなわち、フィルタ・スペクトルを適宜変更することにより）、1470ナノメートルの両側での等しい変動が平均波長に実質的に何の違いももたらさないからである。もちろん、1470ナノメートルと1471ナノメートルの間の変動は、平均波長のわずかな変動をもたらすが、1470ナノメートルの点を中心としたところの曲線の平坦な形状のため、これがほとんど無視できることがわかる。それ故、適宜決定されたスペクトル特性を有するフィルタ250を組み込むことにより、ポンプ波長に対する平均波長のきわめて高い安定性が達成できることがわかるであろう。

【0034】図6Aおよび図6Bは、スペクトル・フィルタ250をファイバ235の長さに沿って間挿することによって達成されるフィードバックのレベルに対する平均波長の安定性の増加を示すグラフである。図6Aに示すように、曲線600はフィードバックを発生したファイバオプティック・ジャイロスコープまたはその他の光学装置によるASE光源230内のフィードバック・レベルに対する出力信号の平均波長の変動を表す。-20デシベルのフィードバックという好ましい動作点にお

いて、±5デシベルという変動（すなわち、-25デシベルから-15デシベルへの）は約0.7ナノメートルという平均波長の変動（△λ）をもたらす。さらに、-20dBの動作点における曲線60の接線の傾きは、約4.5ppm/dBの安定性に対応している。図6Bの曲線650は、フィルタ250を間接した場合のフィードバック・レベルに対する平均波長の変動を表す。図6Bに示すように、-25デシベルから-15デシベルへのフィードバックの変動は、平均波長の正味の変動をもたらさない。これは-20デシベルの点が設定されていて（すなわち、ファイバ235の長さに沿ってフィルタ250の位置を適宜変更することによって）、-20デシベルの両側での等しい変動が平均波長に実質的に何の違いももたらさないからである。もちろん、-25デシベルと-20デシベルの間の変動は、平均波長のわずかな変動をもたらすが、-20デシベルの点を中心としたところの曲線の平坦な形状のため、これがほとんど無視

表1：安定性の比較

	フィルタなし
ポンプ電力	1.3ppm/mW
ポンプ波長	2.3ppm/nm
フィードバック	4.5ppm/dB

【0037】温度に対する平均波長の安定性については、コンピュータ・シミュレーションを行わなかった。しかしながら、定性分析によれば、同様な方法を使用して、フィルタ250のスペクトル特性を調節することにより、温度に関する平均波長の安定性を上げられることが示されている。特に、温度が上昇した場合、ファイバ235に生じる膨張により、フィルタを画定している長期格子が膨張して、フィルタ250のスペクトル特性が温度に関して変化する。対応する変化がASE光源230によって与えられる出力信号のスペクトル特性に生じるため、フィルタ特性の変化がASE光源230のスペクトル特性の変化に釣り合うようにフィルタ特性を設定することが可能である。

【0038】たとえば、温度が上昇した場合に一般に見られる効果の1つは約1560ナノメートルのところにあるピーク100が長い平均波長へシフトして、温度が上昇すると、平均波長が増加する傾向があることである。しかしながら、フィルタを適切に設定した場合、フィルタリング特性がシフトすると、デエンファシスされたピーク110の減衰が少なくなる。それ故、ピーク100における波長は増加しても（右へシフトする）、ピーク110の強さの増加によって、正味平均波長が変化することはなくなる。この効果を図8に示す。

【0039】図8に示すように、曲線810は好ましい実施の形態のノッチ・フィルタを使用してASE光源が出力する光のスペクトル分布を表す。曲線820は温度が上昇した場合の同一のASE光源に対するスペクトル分布を表す。上述のように、温度が上昇した場合、フィ

できることがわかる。それ故、ファイバ235の長さに沿った適切な位置に配置されたフィルタ250を組み込むことにより、フィードバックに対する平均波長のきわめて高い安定性が達成できることがわかるであろう。

【0035】図4A、図4B、図5A、図5B、図6Aおよび図6Bに示した結果は、コンピュータ・シミュレーションの精度を確認するための実際の実験によって確認されたコンピュータ・シミュレーションに基づくものである。有利な実施の形態の1つにおいては、Lucent Technologiesから入手可能な周知のOASIXモデリング・アルゴリズムを使用して、選択した用途に最適なファイバ長さ、フィルタ特性、およびフィルタ位置に到達するのに必要なシミュレーションを行うことができる。このモデリングおよび実験による向上した安定性の結果を、以下の表1に示す。

【0036】

フィルタ付き
0ppm/mW
0ppm/nm
0ppm/dB

ルタの格子はファイバとともに膨張する。それ故、フィルタは長い波長の光を減衰させる。これにより、ノッチ・フィルタのもっとも深い部分が1535nmの波長から移動するため、1535ナノメートルのこぶにおける光が増加することが可能となる。同時に、1560nmのピークが長い波長へ移動して、正味の効果が平均波長と釣り合うようになる。ノッチ・フィルタのスペクトル形状を慎重に選択することにより、1535nmのピークが増加する速度を制御して、平均波長をほぼ一定の値に適切に維持することができる。エルビウムドープ・ファイバの温度係数をオフセットする特定の温度係数を有するフィルタを選択することができる。たとえば、Just in Judkins, et al., 「Temperature Insensitive Long-Period Fiber Gatings」Optical Fiber Communications, PDI1-1, February 1996を参照されたい。

【0040】図9は、本発明の特に好ましい実施の形態におけるフィルタ250のスペクトル特性を示す。図9の曲線900はフィルタの減衰（デシベル単位）と波長（ナノメートル単位）の間の関係をプロットしたものである。図9の曲線900からわかるように、最大のフィルタ減衰は約1533ナノメートルで生じ、減衰量は-20デシベルである。ノッチの帯域幅は約1515ナノメートルから1555ナノメートルまで延びており、合計帯域幅は40ナノメートルである。図9に示したようなスペクトル特性を有しているフィルタは約1535ナノメートルを中心とするピーク110を効果的にデエンファシスするが、1560ナノメートルのところにあるピーク100を大幅に減衰しない。それ故、曲線900に

よって測定される特性を有するフィルタ250はASE光源230から実質的にピークが1つの出力を生じる。

【0041】図7Aないし図7Dは、光源安定化のためスペクトル・フィルタを追加することによって改善できる4つの光源構成を示す。図7Aは、アイソレータを備えているシングルパス光源構成を示す。図7Bは、アイソレータを備えているダブルパス構成を示す。図7Cは、アイソレータを備えていないが、センサからのフィードバックが行われているシングルパス構成を示す。図7Dは、ファイバ增幅光源(FAS)を示す。(たとえばファイバオプティック・ジャイロ・コイル)図7Dに示したFAS光源は、フィードバックを行っているシングルパスと同じものであるが、センサ・フィードバック信号が光源によって増幅されて、センサ出力信号を発生する点が異なっている。

【0042】具体的にいうと、図7Aは、スペクトル・フィルタとしてファイバ705内に配置された長周期格子710を備えているエルビウムドープ・ファイバ705を含んでいるASE光源700を示している。ポンプ光源715は、ポンプ光を入力端部720からファイバ705へ入力する。ファイバ705の第2の端部725は非反射性となるように傾斜研磨されて、ASE光源700のシングルパス光源を形成している。光はASE光源700内で逆方向に増幅され、ファイバ705の第1の端部720から放出される。光はアイソレータ730を通過し、ファイバオプティック・ジャイロスコープ・センサ・システム732への入力として働く。ファイバオプティック・ジャイロスコープ732の出力は、カプラ734によりセンサ出力で検出される。アイソレータ730が存在しているため、フィードバック・レベルが大幅に低下して、通常はこのパラメータに関して平均波長を安定させる必要がないことを理解すべきである。それ故、この構成はアイソレータを用いていない構成よりも大きい設計の融通性をもたらす。

【0043】図7Bは、エルビウムドープ・ファイバ738内でスペクトル・フィルタとして作用する長周期格子740を備えているエルビウムドープ・ファイバ738を含むASE光源735を示す。ポンプ光源742は入力端部ないしポート744を介して、ポンプ光をエルビウム・ファイバ738に結合する。ファイバ738の第2の端部745は信号光を反射して、ASE光源735のダブルパス構成を形成するミラーを含んでいる。光は、ポート744を介してASE光源735から放出され、アイソレータ747を通過して、ファイバオプティック・ジャイロスコープ・センサ・システム749の入力へ入る。センサ・システム749の出力はカプラ750によって出力検出器に結合される。実施の形態の1つにおいて、この構成を使用することにより、浅いノッチ・フィルタが必要となり、またフィルタ740の位置は出力端部744から遠ざかる。アイソレータ747が存

在していることにより、フィードバック・レベルが大幅に低下して、通常はこのパラメータに関して平均波長を安定させる必要がないことを理解すべきである。それ故、この構成はアイソレータを用いていない構成よりも大きい設計の融通性をもたらす。

【0044】図7Cは、スペクトル・フィルタとしてファイバ758内に配置された長周期格子760を有しているエルビウムドープ・ファイバ758を含んでいるASE光源755を示す。ポンプ光源762は入力ポート764から光をファイバ758へ注入する。ファイバ758の第2の端部765は非反射性となるように傾斜研磨されて、ASE光源755のシングルパス構成を形成している。ファイバ758の端部764から逆伝搬方向に放出された光は、アイソレータを通過することなく、ファイバオプティック・ジャイロ・センサ・システム770に入る。それ故、ファイバオプティック・ジャイロスコープからのフィードバックが通常、ASE光源755内で生じ、スペクトル・フィルタ760はセンサ・システムからのフィードバックに関してASE光源755の平均波長を安定化させるのを助ける。センサ出力が図7Cに示すように、カプラ772によって検出される。

【0045】図7Dは、ファイバ778の長さに沿って配置された、スペクトル・フィルタとして働く長周期格子780を有するエルビウムドープ・ファイバ778を含んでいるASEソース775の略図である。ポンプ光源782は、ポンプ光をファイバ778の第1の端部784へ注入する。ファイバ778の第2の端部785は傾斜研磨されて、非反射性となる。それ故、ASE光源775はシングルパス構成に構成される。ASE光源775からの光は逆伝搬方向へ(すなわち、ファイバ778の端部784から)出力されて、ファイバオプティック・ジャイロ・センサ・システム790への入力として働く。センサからの出力は、ASE光源775の端部785から取り入れられて、ASE光源775はFAS光源として構成され、センサ・システムからの光がエルビウムドープ・ファイバ778に沿って増幅されるようになる。もちろん、センサ・システム790からの、増幅される光は顕著なフィードバックを生じ、フィルタ780の位置とスペクトル特性は、FAS構成で受けるもののような高いフィードバックの存在下に、ASE光源775の平均波長を顕著に安定させるように作用する。

【0046】本発明の好ましい実施の形態を上記で詳細に説明してきたが、当分野の技術者には、本明細書に記載した実施の形態のいくつかの自明の改変形およびこれから逸脱が、本発明の精神または本質的な特性から逸脱することなく行えることが理解されよう。たとえば、さまざまな長さおよびドーパント濃度の希土類ドープ・ファイバをASE光源内で使用することができる。さらに、用いられたスペクトル・フィルタは長周期格子フィルタ以外の、ファイバ自体の内部に形成された他のタイ

のスペクトル・フィルタを含んでいてもよい。したがって、本発明の範囲は首記の特許請求の範囲に照らして解釈されるべきである。

【図面の簡単な説明】

【図1】従来のASE光源から放出された光の出力スペクトル密度に対する放出光の波長を示すグラフである。

【図2 A】スペクトル・フィルタをASE光源の遠隔端部の近くにおいてことによる効果を示す図である。

【図2 B】スペクトル・フィルタをASE光源の中間部の近くにおいてことによる効果を示す図である。

【図2 C】スペクトル・フィルタをASE光源の手前端部の近くにおいてことによる効果を示す図である。

【図3】スペクトル・フィルタの特性を利用して、ASE光源が放出した信号のスペクトル密度特性を変更する態様を示すグラフである。

【図4 A】ポンプ電力に対してプロットした平均出力波長に対する安定性特性を表す、スペクトル・フィルタを使用しない場合のグラフである。

【図4 B】ポンプ電力に対してプロットした平均出力波長に対する安定性特性を表す、好ましい実施の形態による特性を有するスペクトル・フィルタを使用した場合のグラフである。

【図5 A】ポンプ波長に対してプロットした平均出力波長に対する安定性特性を表す、スペクトル・フィルタを使用しない場合のグラフである。

【図5 B】ポンプ波長に対してプロットした平均出力波長に対する安定性特性を表す、好ましい実施の形態による特性を有するスペクトル・フィルタを使用した場合のグラフである。

【図6 A】フィードバックに対してプロットした平均出力波長に対する安定性特性を表す、スペクトル・フィルタを使用しない場合のグラフである。

【図6 B】フィードバックに対してプロットした平均出力波長に対する安定性特性を表す、好ましい実施の形態による特性を有するスペクトル・フィルタを使用した場合のグラフである。

【図7 A】シングルパス構成をASE光源とファイバオプティック・ジャイロ・センサ・システムの間のアイソ

レータとともに使用した、本発明の実施の形態の1つの略図である。

【図7 B】ダブルパス構成をASE光源とファイバオプティック・ジャイロ・センサ・システムの間のアイソレータとともに使用した、本発明の実施の形態の1つの略図である。

【図7 C】ASE光源のシングルパス構成をアイソレータを間接せずに使用した、本発明の実施の形態の1つの略図である。

【図7 D】シングルパスASE光源がファイバオプティック・ジャイロ・センサ・システムに入力され、センサ出力がASE光源の遠端部に配置された、本発明の実施の形態の1つの略図である。

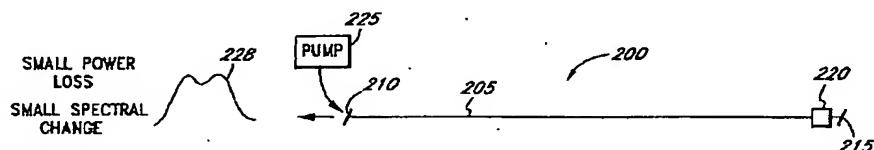
【図8】フィルタ特性を適切に選択することによって、温度補償を達成する態様を示すグラフである。

【図9】本発明の好ましい実施の形態で使用されるスペクトル・フィルタのフィルタ特性の詳細なグラフである。

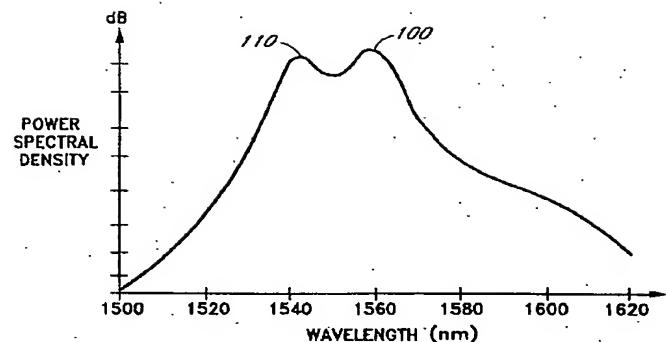
【符号の説明】

110、100 ピーク
 200、230、260 ASE ファイバ光源
 205、235、265、705、758、778 ファイバ
 210、215、240、245、270、275、725、745、765、785 端部
 220、280 スペクトル・フィルタ
 225、255、285、715、742、762、782 ポンプ光源
 228、258、288 300、310、320、400、450、500、550、600、650、810、820、900 曲線
 700、735、755、775 ASE 光源
 710、740、760、780 長周期格子
 720、744、764、784 入力端部
 732、749、770、790 ファイバオプティック・ジャイロスコープ・センサ・システム
 734、750、772 カプラ
 738 エルビウムドープ・ファイバ

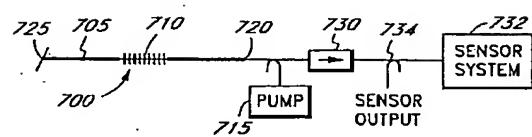
【図2 A】



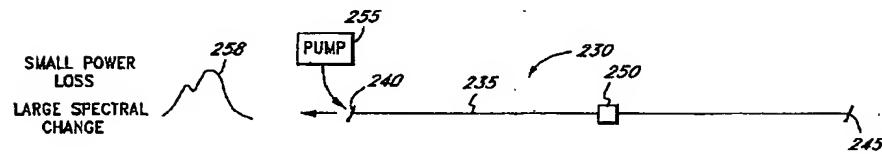
【図1】



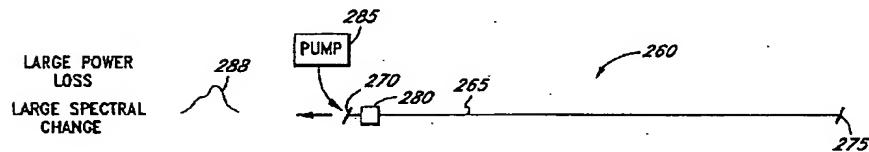
【図7 A】



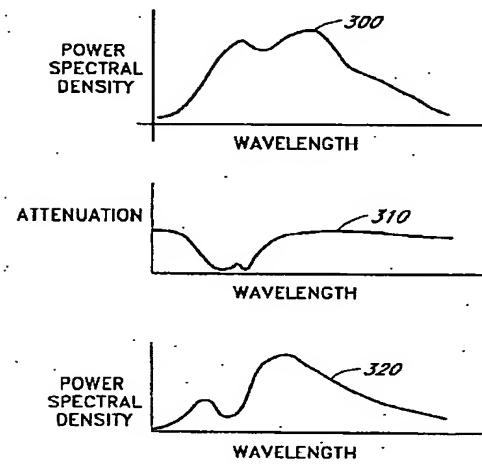
【図2 B】



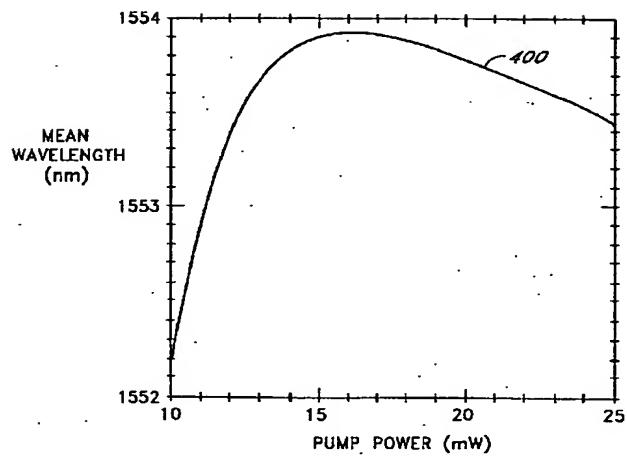
【図2 C】



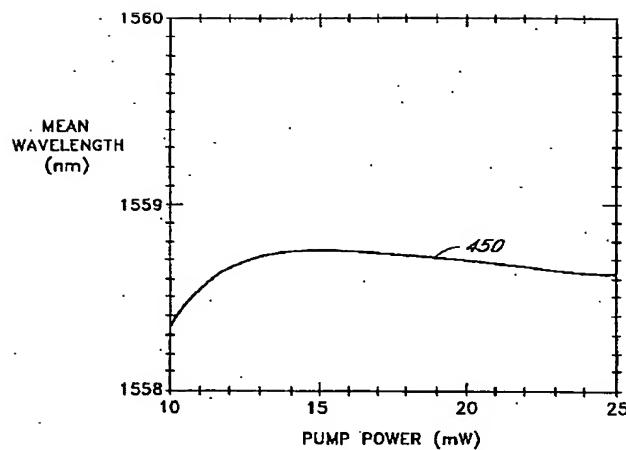
【図3】



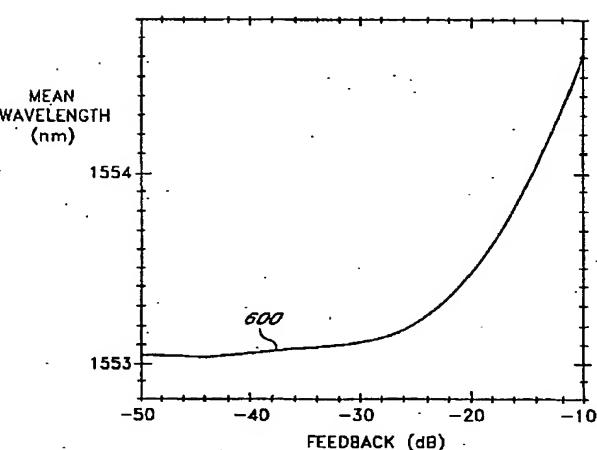
【図4 A】



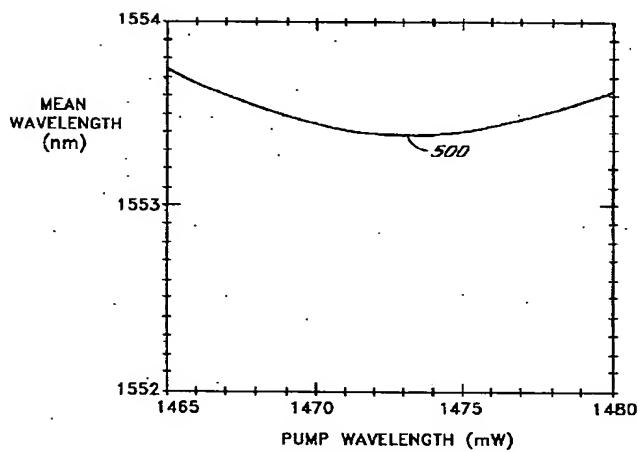
【図4B】



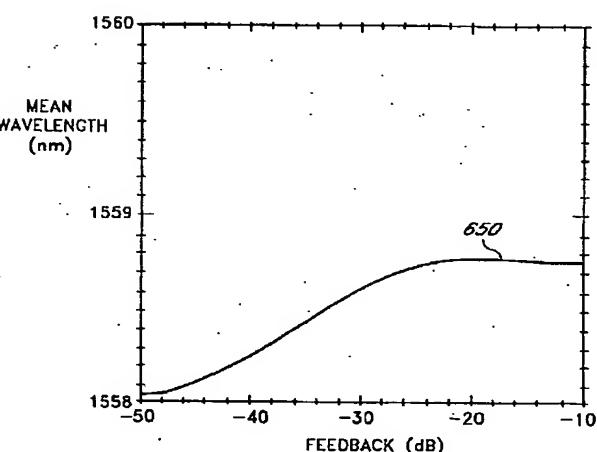
【図6A】



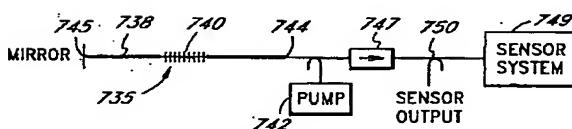
【図5A】



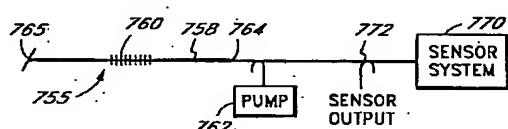
【図6B】



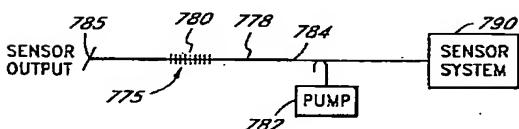
【図7B】



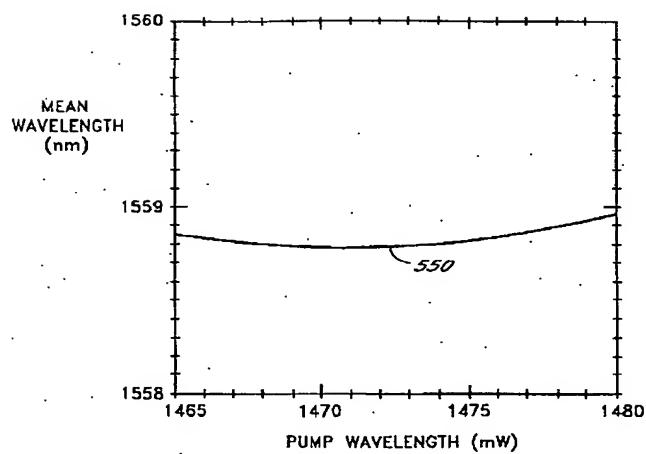
【図7C】



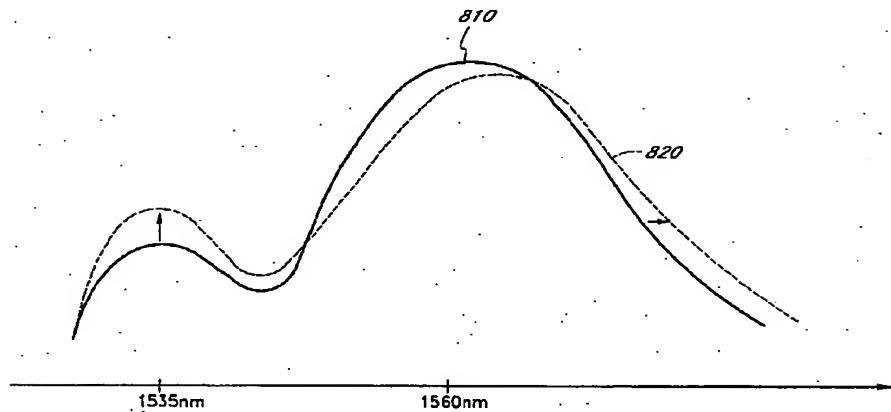
【図7D】



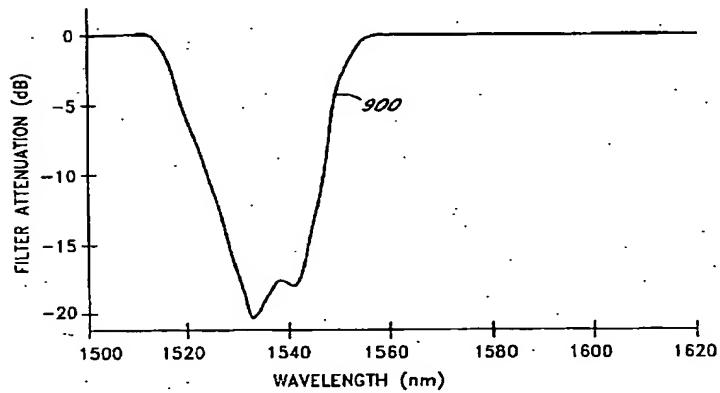
【図5B】



【図8】



【図9】



フロントページの続き

(72)発明者 クレイグダブリュ. ホドソン
アメリカ合衆国, 07974, カルフォルニア
州マウンティンビュー, レングストルフ,
111N. アパートメント180

(72)発明者 ファルキアダリオ
アメリカ合衆国, 94025, カルフォルニア
州メンロパーク, ミドルアベニュー1026D